

生物发酵鼠李糖脂的应用研究进展

黄玉蕙*, 石帅, 郑棱锋, 管啸尘, 王乔玉
(赢创特种化学(上海)有限公司, 上海, 201100)
DOI:10.61369/CDCST.2025040022

摘 要: 鼠李糖脂是一类由微生物发酵产生的绿色表面活性剂, 具有优异的乳化、增溶、抑菌、生物活性及金属螯合性能。文章系统综述鼠李糖脂与生物酶及微生物协同增效、皮肤修复与抗炎、生物膜抑制、环境修复、金属污染治理及日化产品中的应用研究进展。随着工业化生产推进, 鼠李糖脂在日化、农业、医药、环保等领域展现出广阔前景。未来应聚焦工艺优化与复配策略, 提升产率与经济性, 推动其成为新一代可持续绿色解决方案的核心原料。

关键词: 生物发酵; 鼠李糖脂; 生物活性; 抑菌; 协同增效; 绿色核心原料

作者简介: 黄玉蕙, 博士研究生, 现就职于赢创特种化学(上海)有限公司, 从事生物技术清洁产品及相关应用研究开发。E-mail: yvaine.huang@evonik.com。



黄玉蕙

1. 鼠李糖脂特性

鼠李糖脂(Rhamnolipids, RL)是一类由微生物合成的糖脂型阴离子生物表面活性剂, 最早于1949年从铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)代谢产物中被发现^[1]。鼠李糖脂由亲水的鼠李糖基团和疏水的脂肪酸链组成, 其分子结构由1~2个鼠李糖亲水头和1~2条C8~C14碳链构成^[1], 其结构多样, 主要包括单鼠李糖脂和双鼠李糖脂等同系物, 结构分别如图1、图2所示:

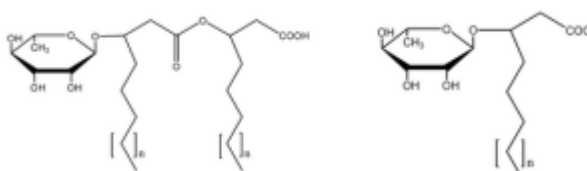


图1 单鼠李糖脂的结构式

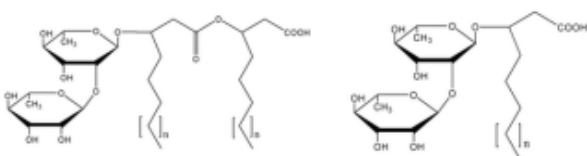


图2 双鼠李糖脂的结构式

其分子结构中含有的羧酸基团的质子化和去质子化特性赋予鼠李糖脂 pH 响应性, 有助于靶向性地转变自组装结构和生物活性^[2,3], 也为 pH 响应性智能材料的开发提供了新思路^[4]。

鼠李糖脂兼具优异表面活性、低临界胶束浓度(CMC 值为 80~200 mg/L)^[5,6]和高环境相容性, 被誉为“下一代绿色表面活性剂”^[7]。与石油基合成表面活性剂相比, 鼠李糖脂可在 4~120℃、pH 2~12 及 0%~20 % NaCl 条件下保持性能稳定^[5,6], 且易于生物降解、毒性低^[1], 符合可持续发展战略对绿色化学品的迫切需求, 在日化、农业、石油、食

品、医药等多个领域展现出广泛的应用前景。

鼠李糖脂主要通过铜绿假单胞菌等微生物发酵制备, 具有原料来源广泛、成本低、环境友好等优点, 但也存在高产菌株稳定性差、产率较低和产物分离纯化难度大、纯化成本高等问题^[1]。目前, 鼠李糖脂的发酵条件、产率、检测方法等仍在不断优化中。2024 年全球首座工业级工厂(赢创, 斯洛伐克)投产^[8], 标志着鼠李糖脂商业化进入加速期。

目前, 关于国内外鼠李糖脂的研究论文呈现快速增长趋势。在 Web of Science Core Collection 数据库中, 有 3259 篇鼠李糖脂相关文献, 聚焦在生物化学、微生物学、环境科学等领域。万方数据库中, 鼠李糖脂的相关文献共 6100 篇, 包括 3050 篇期刊论文, 1689 篇专利和 986 篇学位论文, 涵盖医药卫生、环境科学、安全科学、工业技术、生物科学、农业科学等多个学科。在日化领域, 国内外企业也在积极布局, 如联合利华、欧莱雅等公司已经发表了多项鼠李糖脂相关的专利, 并已将其应用于终端日用消费产品中。

本文将聚焦于鼠李糖脂与酶及微生物协同增效、生物活性、抑菌及抑制生物膜、金属螯合以及乳化增溶 5 个方面的应用性能研究, 综述近年来的研究成果, 旨在为构建高附加值、可持续的绿色新一代解决方案提供新思路, 加快日用化学品等领域的技术升级和绿色化转型。

2. 鼠李糖脂的应用研究进展

2.1 鼠李糖脂在与酶及微生物复配增效领域的应用研究

鼠李糖脂与酶及微生物表现出独特的协同效应, 在低

温洗涤、酶活性保护与生物膜控制中得到了理想的应用效果,这一协同不仅提升了功能表现,还为传统表活难以实现的绿色解决方案提供了可能性。赢创专利^[9]发现,双鼠李糖脂在15℃低温处理WFK60A羊毛织物5次,缩水率仅29.8%,远低于传统方案61.9%的缩水率,这得益于双鼠李糖脂与蛋白之间的弱相互作用,因而不会造成毛鳞片损伤。Marcos López Hernández等人^[10]证明,1:1 RL-SDS混合胶束在3 mM可使脂肪酶活性最大化,为低温低能耗配方提供路径。Madsen等^[11]证实鼠李糖脂单体及胶束不干扰纤维素酶、 α -淀粉酶二级结构,当鼠李糖脂浓度大于0.1 mM时,磷脂酶活性反而升至150%~200%,显示其与酶的高兼容性。诺和新元专利^[12]将30mg/kg RL与0.1 mg/kg脂肪酶复配,使猪油去除率由45.4%提升至55.5%;同一团队^[13]进一步优化配方后将鼠李糖脂与脂肪酶组合对脂肪去除率提升至89.9%(对照单酶54.2%),同时包封丁酸使恶臭降低65%,石化表活总量减少40%,鼠李糖脂还能够有效乳化脂质污垢颗粒,防止污渍重新附着织物,同步解决去污、环保、异味三大痛点。笔者团队^[14]报告鼠李糖脂与蛋白酶复配后,在标准蛋白污布测试中去污力优于LAS/APG与蛋白酶组合,协同效率显著。在生物膜控制领域,诺和新元专利^[15]披露RL与猪肾酰基酶I联用策略:RL胶束先渗透多糖基质,随后酶靶向裂解AHL信号分子,群体感应被中断,生物膜清除率达到70%以上,较单酶提升17%,且无杀菌剂残留,适用于医疗导管与工业管道清洗。这些应用场景不仅展示了技术可行性,也为高附加值产品开发提供了新思路。综上,鼠李糖脂与生物酶的协同,可实现低温高效、低毒低味的绿色清洗。

Otzen^[16]进一步阐明“弱静电-胶束载体”双模协同机制——pH=6时,RL可中和脂肪酶表面电荷,使脂肪酶活性上升,油脂水解效率显著增加;与木质素降解酶复配时,木质素降解酶活性较SDS组提高13%~62%,助力木质纤维素转化。RL胶束可增溶酚类并递送底物至漆酶,达到更高的降解效率。RL以8:1可逆包覆溶菌酶,暴露蛋白酶切位,助铜绿假单胞菌免疫逃逸;协同角蛋白酶彻底清除朊病毒,Western blot零残留,为器械消毒开新径。

有机固废快速水解同样受益于鼠李糖脂与酶的协同作用。Guang-Ming Zeng^[17]等人报道了在固态堆肥中添加0.006%~0.018% RL,淀粉酶活性提升41.6%,CMCase与木聚糖酶同步增强,这是因为鼠李糖脂尾链可逆插入胞外聚合物,瞬时可逆增透膜壁而不损酶构象。Xiangkun Li^[18]

等人首创鼠李糖脂-溶菌酶45℃联合预处理:RL可破坏污泥EPS层,暴露微生物细胞壁,同时增强底物可及性(粒径减小38.2%),Ly靶向水解肽聚糖 β -1,4糖苷键,45℃时酶活保持97.7%。8 h内SCOD释放5788 mg/L、VSS削减55.4%。Qiuxiang Xu^[19]等人开发的污泥发酵体系将RL投加量从0提至0.08 g/g TSS,发现VFAs最大产量提高10倍,可溶性蛋白产量提高3倍;同时水解菌(Ottowia、Proteocatella)及产酸菌(Anaerovorax、Acetoanaerobium)丰度同步提升,为污水厂“循环-可持续”模式奠基。

微生物驱油与污染物降解修复领域,RL也可帮助增效。陈军斌^[20]开发的微生物-鼠李糖脂复合驱油技术关井7~15天内见效速度提升40%,采收率显著提高且地层零损伤;Abiram Karanam Rathankumar^[21]等人开发了一种基于木屑载体辅助真菌系统(WAFS)的策略,以50 mg/kg鼠李糖脂辅助白腐真菌,12天内降解91.26%菲、87.72%苯并芘,漆酶活性提升1.2倍;杨世芳^[22]等人利用铜绿假单胞菌自产鼠李糖脂协同漆酶在10~25天内降解PDMS的Si-C/Si-O键,使分子量降低到29 kDa以下,生成无毒环硅氧烷低聚物。在植物修复场景下,张烁琛^[23]发现鼠李糖脂-黑麦草联合体在12周内使土壤中的PCBs降解41.8%;徐雪雯^[24]棉花盐胁迫试验中,200~400 mg/L鼠李糖脂使根长、根尖数分别提升26%、31%,超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性分别提升35%、42%、28%,渗透调节物质显著上调。

综上所述,鼠李糖脂通过与生物酶及微生物的协同作用,在多个应用场景中展现出显著的功能优势。其作用机制主要包括降低界面张力、改善基质可及性以及促进酶活性表达,这些效应在低温洗涤中能够提高去污效率并减少能耗,在生物采油过程中有助于提高原油回收率,同时在污染物降解与环境修复中加速有机污染物的生物转化过程。

因此,基于鼠李糖脂与生物酶/微生物的复合体系不仅体现出良好的应用潜力,更符合绿色化学和可持续发展的理念,具有成为新型技术解决方案的可能性。

2.2 鼠李糖脂在生物活性领域的应用研究

鼠李糖脂是微生物的次级代谢物,兼具阴离子表面活性性与生物活性。近年来,研究者不仅关注其表面活性,还系统揭示了其在多种生物体系中的作用机制。最新研究阐明,鼠李糖脂通过膜界面靶向、信号通路干预、微生态重塑等多种作用模式,在皮肤屏障、植物抗逆及畜禽代谢等

体系中表现出多效生物活性。

在皮肤护理与创面修复领域, Georgia-Persephoni Voulgaridou^[25]研究团队对两种海洋菌株(MCTG107b和MCTG214(3b1))生产的双鼠李糖脂做了系统测试,发现其细胞毒性显著低于合成表面活性剂合成表活(如Texapon)可通过破坏细胞膜完整性引发速效细胞毒性,而天然鼠李糖脂因复杂糖脂结构,故对细胞膜干扰极低。这一特性为其在敏感肌护理和医疗场景中的应用奠定了安全性基础。Simms A. Adu^[26]等人发现, 20 µg/mL 鼠李糖脂可选择性抑制 SK-MEL-28 细胞迁移,而对 HaCaT 无影响。Wessel^[27]等人发现 95 % Di-RL (3 mg/kg, 腹腔)显著抑制角叉菜胶诱导的机械痛觉与白细胞浸润,首次证实其镇痛活性,机制与阻断 O₂⁻ 爆发及 CXCL1 招募相关。欧莱雅专利^[28]显示在离体人皮模型测试中, 0.2%混合鼠李糖脂在28天内有效逆转辣椒素诱导的毛细血管扩张,红斑面积下降 40 %,机制为抑制神经肽 Substance P 与 IL-1α/IL-8 释放;欧莱雅另一专利^[29]发现鼠李糖脂混合物可有效显著抑制皮肤神经源性炎症,改善反应性皮肤主观症状,使用4周后使皮肤不适感(包括灼热、紧绷、刺痛感等)降低40%,并且鼠李糖脂还可通过非免疫途径改善皮肤反应性,维持皮肤微生态平衡,促有益菌表皮葡萄球菌增殖率上升25%,且不诱发过敏反应。这些结果表明,鼠李糖脂可作为活性成分参与皮肤屏障修复与炎症调控。汉高^[30]发明的单/双鼠李糖脂益生洁面配方,8周内可使炎性痤疮计数下降 68 %,经皮水分流失降低 29 %,且生物降解率大于 90 %,皮肤耐受指数提升 40 %。Chong Shen 等人^[31]首次发现双鼠李糖脂能靶向杀死病理性肌成纤维细胞,细胞实验显示 10~30 mg/L 浓度下, Di-RL (10~30 mg/L) 对 TGF-β1 诱导的人肌成纤维细胞产生选择性杀伤(死亡率>50%),而对正常成纤维细胞几乎无影响。动物实验中,局部使用 2 g/L 双鼠李糖脂使兔耳瘢痕隆起指数降低41%,同时促进 III 型胶原沉积(瘢痕修复关键指标)。机制上可能通过破坏肌成纤维细胞的高刚性细胞膜来达到靶向杀死病理性肌成纤维细胞的效果。Tamara Stipcevic^[32]等人利用铜绿假单胞菌合成了天然双鼠李糖脂 di-rhamnolipid BAC-3,发现了其“抑制纤维化+促进上皮化”双向调节创面细胞行为,显著加速烧伤愈合并减少瘢痕,21 天内全层烧伤模型创口闭合速度加快了 32 % ($p < 0.05$), 35 天内完全愈合,创口处胶原蛋白沉积显著降低,为开发新型抗纤维化创面治疗制剂提供了实验依据。Simms A. Adu^[33]等人分

离纯化得到了纯度 97% 的双鼠李糖脂样品,其中主导结构为 Rha-Rha-C10-C10, 占比 57.99%,并通过免疫测定和反转录定量 PCR 实验发现, di-RL 具强效免疫调节功能,通过竞争性结合 IL-1β 受体,阻断 NF-κB 通路,抑制促炎因子(如 IL-8)并激活抗炎因子(如 IL-1RA),因此尤其适用于炎症性皮肤病(如银屑病)的靶向治疗。联合利华专利^[34]发现,在手洗洗洁精配方中添加双鼠李糖脂,可使手部温和肤感提升 48 %,可完全替代配方中的聚乙二醇赋脂剂。这些专利和实验结果共同验证了鼠李糖脂在肌肤护理领域的多维价值,从安全性到功能性均具备差异化优势。

在植物抗逆及畜禽代谢领域,鼠李糖脂也具有潜在生物活性。敬凌琨^[35]以 1 % 双鼠李糖脂改性棉花秸秆生物炭后,中孔比例增加 21.86 %,含氧官能团密度提高 1.4 倍;盐渍土盆栽花生试验中土壤电导率下降 33.65 %,叶片丙二醛降低 28 %,脯氨酸升高 52.83 %,主茎高增 45.41 %,侧枝长增 32.17 %。胡睿^[36]采用相同改性生物炭处理高盐(NaCl 200 mmol/L)花生,土壤电导率降低 123.85 %,脂质过氧化水平下降 45 %,主茎高增 45.16 %,侧枝长增 29.13 %。申文雪^[37]在肉鸡日粮中添加 250~1000 mg/kg 双鼠李糖脂 42 天,滴水损失降低 0.54 %,蒸煮损失降低 3.21 %,pH 值提高 0.12,肉色 L* 值下降 1.8;肝脏 Nrf2、HO-1、SOD1/2、GPx mRNA 表达分别上调 1.8、2.1、1.5、1.9 倍,T-SOD 与 GPx 活性升高 18 % 与 25 %,丙二醛降低 22 %,效果与抗生素组无统计学差异。这些结果显示,鼠李糖脂不仅改善植物抗逆性,还可提升畜禽抗氧化能力,具备替代部分抗生素的潜力。

综上,鼠李糖脂对人体皮肤细胞干扰损伤极低,还具有一定的生物活性,如促进创口愈合、镇痛、促进皮肤微生态平衡等等,为开发具有多重功效的护肤产品提供了新思路。此外,鼠李糖脂也在动植物生长方面也同样表现出了增益效果,进一步验证了其生物活性。

2.3 鼠李糖脂在抑菌及抑制生物膜领域的应用研究

近年来,研究者们还发现了鼠李糖脂在抑菌、抑制生物膜与防腐蚀应用中,展现出了显著优势。这一特性不仅源于其表面活性,还与其独特的膜干预和信号调控机制密切相关。

首先,在基础机理研究上,Herzog^[38]首次以 DSC-AFM 揭示单鼠李糖脂裂解 DPPC 脂质体、双鼠李糖脂诱导囊泡的分子差异;Herzog^[39]进一步证实糖基数决定相变温

度与膜出芽行为; Radlinski^[40]发现亚毒性鼠李糖脂在无质子动力条件下形成跨膜孔道, 实现妥布霉素递送并逆转氨基糖苷耐药。这些结果为鼠李糖脂在药物递送和耐药性干预中的应用提供了理论依据。

在对单一菌株生物膜抑制效果测试中, Yamasaki^[41]证实0.013 % 双鼠李糖脂可特异性抑制口腔致病菌伴放线聚集杆菌的生物膜形成, 抑制率为93%; Diaz De Rienzo^[42]报道0.4 g/L 长链双鼠李糖脂使枯草芽孢杆菌生物膜厚度下降75%; Aleksić^[43]从活血丹根际分离的双鼠李糖脂在50 μg/mL 浓度下即可抑制绿脓杆菌生物膜并保持高细胞相容性; 董雅婷^[44]发现铜绿假单胞菌发酵鼠李糖脂在亚微摩尔级可清除80 % 以上胞外多糖并阻断细菌再黏附。这些研究表明, 鼠李糖脂在低剂量下即可实现高效生物膜干预, 兼具安全性与功能性。在芽孢灭活方面, 牛永武^[45]报道80 mg/L 鼠李糖脂使蜡样芽孢杆菌芽孢 DPA 泄漏51.6 %, 无需抗生素即可灭活芽孢。纳米递送系统中, Marangon^[46]制备287 nm 壳聚糖/鼠李糖脂纳米粒, 对葡萄球菌生物膜清除率达到99 % 以上。这为开发新型抗菌纳米载体提供了思路。

在口腔护理场景下, 李穗君^[47]设计的4:6 双/单鼠李糖脂牙膏对变异链球菌 MIC 为0.0059 % (w/v), 1.5 % 质量浓度下生物膜抑制率超过88 %, 兔红细胞 H₅₀=130 μg/mL, 牙龈成纤维细胞安全窗0.0015 %~0.002 %, 显著优于传统表面活性剂。创面与皮肤应用中, Malakar^[48]发现0.5 mg/mL 甘油鼠李糖脂 -Gly 在7 天内促使金黄色葡萄球菌感染创面完全愈合; Rahimi^[49]报道25.87 μg/mL 单鼠李糖脂可通过 p53 通路诱导 MCF-7 凋亡。

在农业与植物病原防控领域, Zhao^[50]发现田间场景下, 单鼠李糖脂 IC₅₀<5 mg/L, 抑菌圈 >25 mm; 陈瑶^[51]利用21.5 g/L 工程菌鼠李糖脂对29种植物病原真菌中的鞭毛菌抑制率达80 %; 卢玉慧^[52]证实30 mg/L 鼠李糖脂对梨黑斑病菌孢子抑制率达88.69 %; 张贤玉^[53]报道鼠李糖脂对灰葡萄孢的 EC₅₀为0.51 μL/mL; 刘韵怡^[54]与罗惠芳^[55]以铜绿假单胞菌 A39-1 发酵制备得到鼠李糖脂, 并发现鼠李糖脂可显著抑制寄生水霉菌丝生长(250 mg/L 浓度下, 抑制率为100%) 和孢子萌发(15.625 mg/L 浓度下, 抑制率为85.7%), 主要是通过破坏细胞膜结构发挥作用抑制作用。食品防腐方面, 专利 CN102458129B^[56]将鼠李糖脂与有机酸及真菌挥发物复配, 可实现7 天内对奶酪青霉的100 % 抑制。这些应用场景凸显鼠李糖脂在绿色农业和食品安全中的潜力。

工业水系统微生物腐蚀控制中, Lima Rocha^[57]报道96 % 单鼠李糖脂使石油采出水碳钢活菌降至 < 0.1 %; Peng^[58]构建铜-鼠李糖脂体系, 将硫酸盐还原菌生物膜厚度由76.6 μm 降低至18.9 μm, 腐蚀抑制率75 %; 王娅利^[59]以500 mg/L 鼠李糖脂与 DBNPA 协同, 使 X80 钢腐蚀速率降低77.8 %, 固着菌下降3 个数量级; Li^[60]在模拟海水中0.1 % 鼠李糖脂使 X70 钢腐蚀速率下降72 %。

以上数据表明, 鼠李糖脂对细菌、真菌、芽孢及腐蚀微生物都具有抑制效果, 在口腔护理、创面愈合、农业病害、食品防腐及工业防腐领域均展示出较好的应用效果。

2.4 鼠李糖脂在金属螯合领域的应用研究

鼠李糖脂结构中的羧基(-COOH) 与羟基(-OH), 可作为活性位点螯合 Cd²⁺、Pb²⁺ 等重金属离子形成稳定环状络合物, 这一特性不仅使其成为绿色替代化学螯合剂的潜在候选, 还显著降低土壤结构破坏风险, 为重金属及复合污染修复提供了新的技术路径。

Jia Wen^[61]田间试验显示鼠李糖脂降解速度快于 EDTA, 且在高有机质土壤中其降解速度可进一步加速, 这意味着其环境残留风险更低, 符合绿色修复理念。张洁^[62]系统总结鼠李糖脂对 Cd、Pb、Cu 去除率分别达43 %、68 %、56 %, 并提出鼠李糖脂-PAHs 协同修复框架, 为复合污染场地提供理论依据。袁婷婷^[63,64]证明在 pH 8~10、30~50 °C 条件下, 2 g/L 鼠李糖脂使矿区土壤和水相 Cd²⁺ 去除率分别达65.9 % 与76.3 %; 孙乔^[65]以未提纯鼠李糖脂发酵液三次淋洗土壤, Cd 去除率48.5 %, 养分损失低于 EDTA。这些结果显示, 鼠李糖脂在保持修复效率的同时, 能降低对土壤养分的破坏, 具备生态优势。Ahmed Sorour^[66]以2 % 单鼠李糖脂激活向日葵 HaZIP1 表达, Cd/Zn 富集量超欧盟安全标准5~10 倍, 并以废植物油作碳源完成“废弃物-表面活性剂-修复”闭环, 不仅实现污染治理, 还兼顾资源循环利用, 体现可持续性。Jolanta Ciefla^[67]证实1:1 单/双鼠李糖脂预胶束对 Cu²⁺ 固定率95.82 %, 且不影响体系 pH 值。Li Sang 以0.2 % 鼠李糖脂包覆纳米零价铁, 使高镍土壤修复率突破90 %。

Bairen Yang^[68]将鼠李糖脂-稀土螯合物嵌入生物滴滤塔, 0.013 % 双鼠李糖脂使间二氯苯去除率提升29 %, 并通过刺激 EPS 分泌与提高 C230 活性实现“传质-成膜-降解”三重放大。Wei^[69]开发的壳聚糖-鼠李糖脂-苹果酸复合抑尘剂(1.928 % 鼠李糖脂) 将 PM_{2.5} 捕集效率提至94 %, 铝粉氢气释放量压缩78 %, 表面张力降至28.7 mN/

m。武青芳^[70]合成鼠李糖脂-钙螯合物(Ca^{2+} :鼠李糖脂=1:2), CMC 仅 223.7 mg/L, 该新型螯合物兼具表面活性与金属固定功能, 为日化及功能材料开发提供可能。

综上, 鼠李糖脂可通过羧基、羟基位点与金属离子发生螯合, 既可替代传统螯合剂, 也在土壤修复领域表现出了优于传统方案的卓越性能, 同时也可制备鼠李糖脂-金属新材料, 应用于日化、土壤修复、环保抑尘等领域。

2.5 鼠李糖脂在乳化增溶领域的应用研究

鼠李糖脂作为一种来源于微生物的天然表面活性剂, 因其优异的乳化、增溶性能以及生物相容性, 在药物递送、环境修复及其他界面调控相关领域展现出广泛的应用潜力。

在化妆品领域, 赢创科学家 Brandt^[71,72]等证实 3% 鼠李糖脂水溶液($\text{pH}=6$)对长效彩妆的卸除效率优于乙氧基化增溶剂, 且 1% 精油增溶时所需鼠李糖脂量显著低于多数无 PEG 增溶剂, 可与含 PEG 标杆产品竞争。这表明鼠李糖脂在“无 PEG”趋势下具备替代潜力。

环境修复方面, Arkhipov^[73-75]等发现假单胞菌来源未分馏鼠李糖脂在 100 g/L 时可将乙苯、甲苯增溶比例分别提高至 99% 与 92%, BTEX 分子被包裹于鼠李糖脂胶束疏水内核, 扩散系数降至胶束水平。该机制为有机污染物迁移与生物降解提供了理论支持。

食品活性成分增溶中, Zhu^[76]等利用微流控自组装构建 Cur-SPI-鼠李糖脂三元纳米晶体, 将姜黄素溶解度提升 142~665 倍, 负载量由 4% 增至 11%。这一结果显示鼠李糖脂在功能食品开发中具有优势。

鼠李糖脂与其他成分复配增效亦被广泛验证: 黄青青^[77]等报道鼠李糖脂-茶皂素 1:16.63 复配使 CMC 下降 19.8%, 泡沫、去污、乳化力分别提升 15%、14%、14%; 张国瑞^[78]等发现鼠李糖脂-乳清蛋白复配可将乳液粒径从 11.3 μm 降至 5.0 μm , 接触角由 101° 降至 7.6°, 乳化活性显著增强。这些复配策略不仅提升性能, 还可能降低单剂使用量, 缓解成本压力。

染色与药物递送方面, Yiu Lun Alan Tang^[79]构建鼠李糖脂-柠檬烯反胶束体系, 实现棉织物无盐无碱活性染料染色, TEM 显示 300 nm 球形反胶束有效包埋染料, 提升上染率。Gawon Yi^[80]以鼠李糖脂自组装纳米颗粒递送疏水光敏剂 Pba, 粒径 136 nm, 载药效率 91.5%, 体系在 PBS 中稳定 1 个月。这些结果验证了鼠李糖脂在绿色染整与靶向药物递送中的应用潜力。农药乳化中, Jayita Chopra^[81]

以鼠李糖脂制备 15% 印楝油纳米乳, O/S=7.13 时, 液滴 194.9 nm, 30 天无分层, 叶面接触角由 50° 降至 30°, 显著改善润湿。

此外, 鼠李糖脂在含水层修复、食品质构改良、纳米乳液驱油、煤尘治理及废气净化等场景亦表现突出: 曲丹等^[82]发现 0.2% 鼠李糖脂淋洗液可将苯出流浓度降至 0.29 mg/L; 孙艺铭^[83]等 0.1% 鼠李糖脂使海绵蛋糕比容提高 7%, 硬度下降 34.65%; 杨乐^[84]等发现鼠李糖脂-吐温 80 自微乳抑制 HeLa 细胞存活率至 20.53%; 张峙^[85]等人制备的鼠李糖脂-异丙醇纳米乳液可使驱油采收率提升 17%; 王林芝^[86]等人发现了鼠李糖脂在煤尘治理中的高效润湿与降尘性能, 0.04% 鼠李糖脂对煤尘全尘、呼尘降尘效率分别达 79.11%、74.93%; 刘燕泽华^[87]等人阐明鼠李糖脂在生物滴滤器中通过强化生物膜特性提高氯苯废气净化效率的机制, 80 mg/L 鼠李糖脂使生物滴滤器氯苯去除率升至 81%。这些跨领域应用进一步凸显鼠李糖脂的界面调控优势。

综上, 鼠李糖脂凭借高效乳化增溶、环境友好及复配增效优势, 在化妆品、环境修复、食品、医药及农业等多个领域展现出了应用潜能。

3. 总结与展望

纵观近年来围绕鼠李糖脂的应用研究, 学者们对其除表面活性外的多重特性探索逐步深入, 在与生物酶、微生物的协同增效、潜在生物活性、抑菌与生物膜抑制、防腐、螯合性以及增溶乳化性能等方面均取得了创新性发现, 为构建高附加值、更可持续的绿色解决方案提供了新的思路。

在日化行业, 鼠李糖脂有望实现“多品类渗透”, 从羊毛织物精致洗护到厨房重垢清洁, 从口腔抑菌到敏感肌舒缓, 逐步解决传统表面活性难以兼顾的“温和-高效-环保”三角矛盾, 并转化为可量产、可验证、可传播的解决方案。例如, 在织物护理端, 帮助品牌应对“低温洗涤”和“衣物寿命延长”两大消费者痛点; 在个人护理赛道, 增强皮肤屏障, 打造“敏感肌适用”清洁方案, 契合“微生态护肤”理念; 在口腔护理场景, 显著抑制生物膜形成等。

随着消费者对天然绿色原料的支付意愿提升, 鼠李糖脂已从技术储备走向品牌差异化卖点, 国际巨头将“鼠李糖脂”印在瓶身, 新锐品牌以“生物发酵技术”进行社媒种

草,这预示着鼠李糖脂有望在下一轮日化升级浪潮中成为行业共识。

目前,性价比问题仍是制约鼠李糖脂发展的关键因素。当前生产成本低、纯化过程复杂,使其在大规模应用中缺乏价格优势,因此亟需在技术创新与经济可行性之间找到平衡。一方面,通过发挥鼠李糖脂的多功能特性和协同效应,创造传统表面活性剂无法实现的高附加值应用场景,以功能优势弥补成本劣势;另一方面,未来需聚焦工艺优化与资源利用,如采用低成本碳源、提高发酵产率、开发复配策略,以降低单剂量使用量并提升整体经济性。

参考文献

- [1] 蔡京荣,吕佳佳.生物表面活性剂鼠李糖脂研究概况[J].中国洗涤用品工业,2019(4):60-67.
- [2] Jakeline de Freitas Ferreira, Estevão Alan Vieira, Marcia Nitschke. The antibacterial activity of rhamnolipid biosurfactant is pH dependent [J]. Food Research International, 2019, 116: 737-744.
- [3] Tathiane Ferroni Passos, Marcia Nitschke, The combined effect of pH and NaCl on the susceptibility of *Listeria monocytogenes* to rhamnolipids[J]. Food Research International, 2024, 192: 114744.
- [4] Kadakia P, Valentin JDP, Hong L, et al. Biocompatible Rhamnolipid Self-Assemblies with pH-Responsive Antimicrobial Activity [J]. Adv Health Mater. 2024, 13(4): e2302596.
- [5] 罗志刚,杨欢,齐亮.生物表面活性剂鼠李糖脂性质的研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(01):30-37.
- [6] 郑兰健,臧颖,林潼,等.高产生物表面活性剂鼠李糖脂的制备及性能研究[J].日用化学工业,2022,52(09):937-944.
- [7] 肖进新, Milica Lukic, Ivana Pantelic,等.化妆品配方用新型表面活性剂(续完)[J].日用化学品科学,2017,40(08):8-10,12-15.
- [8] 杨惠莹.赢创兴建全球首座工业级生物表面活性剂鼠李糖脂生产工厂[J].现代化工,2022,42(02):56.
- [9] EVONIK OPERATIONS GMBH. Biosurfactant for washing wool[P]: WO 2025/036643 A1. (2025-02-20).
- [10] Marcos López Hernández, Daniel E. Otzen, Jan Skov Pedersen. Investigating the interactions between an industrial lipase and anionic (bio) surfactants [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2025, 679: 294-306.
- [11] Madsen JK, Pihl R, Møller AH, Madsen AT, Otzen DE Andersen KK (2015) The anionic biosurfactant rhamnolipid does not denature industrial enzymes[J]. Front. Microbiol, 2015, 6:292:1-13.
- [12] NOVOZYMES A/S. Composition comprising a lipase and a booster[P]: US 2025/0129310 A1. (2025-04-24).
- [13] NOVOZYMES A/S. Lipase with low malodor generation[P]: PCT/EP2022/051847. (2023-08-03).
- [14] 黄玉蕙,管啸尘,王乔玉,等.鼠李糖脂及其在洗涤剂中的应用性能研究[J].中国洗涤用品工业,2024,08:61-69.
- [15] NOVOZYMES BIOTECH, INC. Methods for eliminating the formation of biofilm[P]: US 6,777,223 B2. (2004-08-17).
- [16] Daniel E. Otzen. Biosurfactants and surfactants interacting with membranes and proteins: Same but different?[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2017, 1859:639-649.
- [17] Guang-Ming Zeng, Jin-Gang Shi, Xing-Zhong Yuan, et al. Effects of Tween 80 and rhamnolipid on the extracellular enzymes of *Penicillium simplicissimum* isolated from compost [J]. Enzyme and Microbial Technology, 39(7): 1451-1456.
- [18] Xiangkun Li, Hongwei Xie, Gaige Liu, Ruijun Zhang, Xiaochen Ma, Hongying Chen. Optimizing temperature for enhancing waste activated sludge decomposition in lysozyme and rhamnolipid pretreatment system[J]. Bioresource Technology, 2021, 341: 125868.
- [19] Qiuxiang Xu, Jiamin Zhang, Liang Guo, Jianwei Zhao, Min Pan, Xuran Liu, Jonathan W.C. Wong. Rhamnolipid-assisted anaerobic fermentation of primary sludge to improve the recovery of volatile fatty acids[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13: 118613.
- [20] 西安石油大学.一种微生物和生物活性剂复合增产方法[P]: CN 101839126 B. (2013-03-27).
- [21] Abiram Karanam Rathankumar, Kongkona Saikia, Senthil Kumar Ponnusamy, et al. Rhamnolipid-assisted mycoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Trametes hirsuta* coupled with enhanced ligninolytic enzyme production[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2020, 70(12): 1260-1267.
- [22] 杨世芳,侯前朋,刘云鹏,等.铜绿假单胞菌对聚二甲基硅氧烷无害化处理及酶促降解机制[J/OL].中国环境科学,2025,1-14.
- [23] 张烁琛,潘召培,田应香,等.鼠李糖脂与黑麦草联合修复多氯联苯污染土壤的研究[J].台州学院学报,2025,47(03):66-72.
- [24] 徐雪雯,王兴鹏,王洪博,等.鼠李糖脂对盐胁迫下棉花幼苗根系生长的调控作用[J].中国农业科技导报(中英文),2025,27(01):72-79.
- [25] Voulgaridou, G.-P., Mantso, T., Anastopoulos, I., et al. Toxicity Profiling of Biosurfactants Produced by Novel Marine Bacterial Strains[J]. Int. J. Mol. Sci. 2021, 22, 2383.
- [26] Adu SA, Twigg MS, Naughton PJ, et al. Biosurfactants as Anticancer Agents: Glycolipids Affect Skin Cells in a Differential Manner Dependent on Chemical Structure[J]. Pharmaceutics. 2022, 14(2):360.
- [27] Wessel, Kamila BB. Targeted-Produced Dirhamnolipids from *Pseudomonas aeruginosa* Induce Antinociception in Mice[J]. ACS Omega, 2025, 10, 36056-36067.
- [28] L'OREAL. Use of rhamnolipids for the cosmetic treatment of skin redness[P]: EP 3 338 762 A1. (2018-06-27).
- [29] L'ORÉAL. Use of rhamnolipids for the cosmetic treatment of reactive skin[P]: EP 3 338 763 A1. (2018-06-27).
- [30] HENKEL AG & CO. KGAA. Biotenside enthaltende kosmetische Reinigungsmittel mit prebiotische Aktivität[P]: DE 10 2015 217 507 A1. (2017-03-16).

- [31] Shen, Chong. "Targeted killing of myofibroblasts by biosurfactant di-rhamnolipid suggests a therapy against scar formation[J]. Scientific reports, 2016,6(1): 37553.
- [32] Stipcevic, Tamara, Ante Piljac, et al. Enhanced healing of full-thickness burn wounds using di-rhamnolipid[J]. Burns, 2006,32 (1): 24-34.
- [33] Adu, S. A., Twigg, M. S., Naughton, P. J., et al. Characterisation of cytotoxicity and immunomodulatory effects of glycolipid biosurfactants on human keratinocytes[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2023, 107(1), 137-152.
- [34] 联合利华知识产权控股有限公司. 鼠李糖脂在表面活性剂体系中的用途 [P]: CN 112513236 A. (2021-03-16).
- [35] 敬凌琨,王洪博,曹振玺,等. 鼠李糖脂改性对棉花秸秆生物炭结构特性及其盐胁迫下植物生长的影响 [J/OL]. 材料导报, 2025,1-14.
- [36] 胡睿,张帝,丁瑞川,等. 鼠李糖脂改性生物炭对花生盐胁迫的缓解效 [J]. 现代农业科技, 2025,12: 37-42.
- [37] 申文雪,吴艳萍,许英蕾,等. 鼠李糖脂对肉鸡腿肌肉品质、常规化学成分和抗氧化功能的影响 [J]. 中国粮油学报, 2022, 37(01): 122-127.
- [38] Herzog, Marius, Lei Li, et al. Impact of the number of rhamnose moieties of rhamnolipids on the structure, lateral organization and morphology of model biomembranes[J]. Soft Matter, 2021, 17 (11): 3191-3206.
- [39] Herzog, Marius, Till Tiso, et al. Interaction of rhamnolipids with model biomembranes of varying complexity[J]. Biochimica Et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes, 2020, 1862(11): 183431.
- [40] Yarlagaadda, Venkateswarlu, Gerard D. Wright. Membrane-active rhamnolipids overcome aminoglycoside resistance[J]. Cell Chemical Biology, 2019, 26 (10): 1333-1334.
- [41] Yamasaki, Ryota, Aki Kawano, et al. Rhamnolipids and surfactin inhibit the growth or formation of oral bacterial biofilm[J]. BMC microbiology, 2020, 20(1): 358.
- [42] De Rienzo, Mayri A. Díaz, et al. Effect of mono and di-rhamnolipids on biofilms pre-formed by *Bacillus subtilis* BBK006[J]. Current Microbiology, 2016, 732 (2): 183-189.
- [43] Aleksic, Ivana, Milos Petkovic, et al. Anti-biofilm properties of bacterial di-rhamnolipids and their semi-synthetic amide derivatives[J]. Frontiers in microbiology, 2017, 8: 2454.
- [44] 董雅婷,李彭宇,孙莹莹,等. “除膜四部曲”策略: 阿奇霉素/鼠李糖脂自组装纳米粒用于清除铜绿假单胞菌生物被膜的研究 [J]. 四川大学学报 (医学版), 2021,52(04):598-604.
- [45] 牛永武,乔杉,孙艺铭,等. 鼠李糖脂抑制芽孢态蜡样芽孢杆菌的活性及机制 [J]. 食品科学, 2024,45(06):80-86.
- [46] Marangon, Crisiane A., Virginia CA Martins, et al. Combination of rhamnolipid and chitosan in nanoparticles boosts their antimicrobial efficacy[J]. ACS applied materials & interfaces, 2020, 12 (5): 5488-5499.
- [47] 李穗君,钟显,谢静辉,等. 两种生物糖脂在牙膏产品中的应用研究 [J]. 口腔护理用品工业, 2025, 35 (04): 10-14.
- [48] Malakar, Chandana, Bhaswati Kashyap, et al. Antibiofilm and wound healing efficacy of rhamnolipid biosurfactant against pathogenic bacterium *Staphylococcus aureus*[J]. Microbial Pathogenesis, 2024, 195: 106855.
- [49] Rahimi, Kobra, Tayebe Bagheri Lotfabad, Farhat Jabeen, et al. Cytotoxic effects of mono- and di-rhamnolipids from *Pseudomonas aeruginosa* MR01 on MCF-7 human breast cancer cells[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2019, 181: 943-952.
- [50] Zhao Feng, Bingxin Wang, Menglin Yuan, et al. Comparative study on antimicrobial activity of mono-rhamnolipid and di-rhamnolipid and exploration of cost-effective antimicrobial agents for agricultural applications[J]. Microbial Cell Factories 2022, 21(1): 221.
- [51] 陈瑶,史荣久,郑良灿,等. 鼠李糖脂粗提物对植物病原真菌的抑菌作用 [J]. 生态学杂志, 2022,41(03):520-527.
- [52] 卢玉慧,刘志恬,李永才,等. 鼠李糖脂对梨采后黑斑病的抑制机理 [J]. 食品与生物技术学报, 2023,42(08):21-30.
- [53] 张贤玉,李佳宁,刘召阳,等. 鼠李糖脂对7种常见植物病原真菌的室内活性评价 [J]. 农业与技术, 2020, 40(14): 10-12.
- [54] 刘韵怡,戚建华,王年,等. 生物表面活性剂鼠李糖脂对寄生水霉的体外抑制作用 [J]. 大连海洋大学学报, 2022,37(01):95-103.
- [55] 罗惠芳,刘韵怡,王昭玥,等. 鼠李糖脂对寄生水霉 ATCC200013 生物膜的抑制作用 [J/OL]. 南方农业学报, 1-12[2025-08-31].
- [56] 简耐而生物表面活性剂有限公司. 抗微生物组合物及相关的应用方法 [P]: CN 102458129 B.(2015-06-10).
- [57] Rocha, Vanessa Alves Lima, Livia Vieira Araujo de Castilho, et al. Antibiofilm effect of mono-rhamnolipids and di-rhamnolipids on carbon steel submitted to oil produced water[J]. Biotechnology progress, 2021, 37(3): e3131.
- [58] Xiao Peng, Yuhua Su, Weixiao Kong, et al. Eco-Friendly Biofilm Dispersion: Biosurfactant-Metal Complexes Efficiently Disrupt Adhesion Architecture of Sulfate-Reducing Bacteria[J]. Environmental Research, 2025, 285: 122343.
- [59] 王娅利,管方,段继周,等. 鼠李糖脂与2,2-二溴-3-次氨基丙酰胺协同抑制 X80 管线钢的微生物腐蚀 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(06): 1412-1422.
- [60] Li Zhong, Xinyi Yuan, Mingyue Sun, et al. Rhamnolipid as an eco-friendly corrosion inhibitor for microbiologically influenced corrosion[J]. Corrosion Science 2022, 204: 110390.
- [61] Jia Wen, Samuel P. Stacey, Mike J. McLaughlin, et al. Biodegradation of rhamnolipid, EDTA and citric acid in cadmium and zinc contaminated soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(10): 181-188.
- [62] 张洁,靳静. 鼠李糖脂去除多环芳烃、石油烃及重金属的应用研究进展 [J]. 广州化工, 2023, 51(20): 10-14.
- [63] 袁婷婷,齐超,席雪萍,等. 鼠李糖脂对水中重金属 Cd 的去除效率研究 [J]. 环境科学与管理, 2024,49(08):86-90.
- [64] 袁婷婷,马玉,王志强,等. 鼠李糖脂对荒漠矿区土壤重金属镉的去除效率研究 [J]. 矿业研究与开发, 2020,40(11):117-122.
- [65] 孙乔,邱海燕,兰贵红,等. 鼠李糖脂发酵液淋洗镉污染土壤的

研究[J].应用化工,2023,52(07):2063-2067.

[66] Sorour, Ahmed, Najlaa Zobair, et al. Rhamnolipid from *Pseudomonas* sp. as a green surfactant for enhanced phytoremediation[J]. Scientific Reports, 2025,15(1): 29780.

[67] Jolanta Ciefla, Magdalena Koczanska, Andrzej Bieganski. An Interaction of Rhamnolipids with Cu^{2+} Ions[J]. Materials, 2018, 11(3): 345-357.

[68] Yang Bairen, Jiajie Wang, Qingqing Shang, et al. Synchronously enhanced biofilm formation and m-dichlorobenzene removal in biotrickling filters by rhamnolipid chelating rare earth elements[J]. Environmental Pollutants and Bioavailability 2022, 34 (1): 575-585.

[69] Wei Yingchao, Li Shihang, Shunyu Nan, Zhang, et al. Development of an Eco-Friendly Aluminum Dust Suppressant with Dual Functionality: Dust Control and Hydrogen Inhibition[J]. Chemistry Select, 2025, 10(22): e01436.

[70] 武青芳, 骆宇璐, 孟琴. 鼠李糖脂钙的制备及物理化学性质表征[J]. 高校化学工程学报, 2023,37(01):80-85.

[71] Kathrin Brandt, Verena Dahl, Alina Muss, et al. Glycolipids – A New Era in Natural Cleansing[J]. SOFW Journal Home & Personal Care Ingredients & Formulations, 2023.

[72] Kathrin Brandt, Hans Henning Wenk, Joaquin Pérez Sanchez, et al. Rheance® Glycolipids – A breakthrough in natural cleansing[J]. Expression Cosmétique, 2018.

[73] Victor P. Arkhipov, Ruslan V. Arkhipov, Ekaterina V. Petrova, et al. Micellar and solubilizing properties of rhamnolipids[J]. Magnetic Resonance in Chemistry, 2023, 61(6): 345-355.

[74] Victor P. Arkhipov, Ruslan Arkhipov, Andrei Filippov. Rhamnolipid Biosurfactant: Use for the Removal of Phenol from Aqueous Solutions by Micellar Solubilization[J]. ACS Omega, 2023, 8(28): 30646-30654.

[75] Victor P. Arkhipov, Ruslan Arkhipov, Andrei Filippov. Micellar Solubilization of Phenols With One or Two Hydroxyl Groups Using Biological Surfactant Rhamnolipid[J]. Magnetic Resonance in Chemistry, 2025.

[76] Ziyi Zhu, Jin Liu, Yue Hu, et al. Tailoring curcumin ternary complex nanocrystals via microfluidic mediated assembly: Stability, solubility, bioaccessibility and formation mechanism[J]. Food Chemistry, 2025, 437: 137913.

[77] 黄青青, 潘凤然, 廖燕科, 等. 茶皂素与鼠李糖脂复配的表面活性增效作用[J]. 湖北农业科学, 2025,64(02):21-26+50.

[78] 张国瑞, 宋永亭, 包木太, 等. 乳清蛋白-鼠李糖脂混合生物乳化剂的性能研究[J]. 日用化学工业, 2019,49(12):783-789.

[79] Yiu Lun Alan Tang, Jiali Yu, Cheng Hao Lee, et al. Limonene biosolvent-based non-aqueous dyeing medium for salt-free and alkali-free rhamnolipid(RL) biosurfactant reverse micellar dyeing of cotton fabric with reactive dyes[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2025.

[80] Gawon Yi, Jihwan Son, Jihye Yoo, et al. Rhamnolipid nanoparticles for in vivo drug delivery and photodynamic therapy[J]. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine, 2019, 19: 12-21.

[81] Jayita Chopra, Priyanka Sahoo, Pradeep Kumar Sow, et al. Investigating the wettability of neem oil nanoemulsion as a green pesticide on leaf surfaces: Optimizing formulation, assessing stability, and enhancing wettability[J]. RSC Advances, 2025, 15, 8645.

[82] 曲丹, 姚禹, 赵冬宇, 等. 鼠李糖脂对苯系物污染含水层的修复效果研究[J]. 环境污染与防治, 2023, 45 (10): 1352-1356.

[83] 孙艺铭, 牛永武, 乔杉, 等. 鼠李糖脂对海绵蛋糕面糊和成品品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023,49(19):199-206.

[84] 杨乐, 杨楠楠, 张卉. 鼠李糖脂辅助载药自微乳体系构建及其抗肿瘤活性探究[J]. 沈阳化工大学学报, 2024,38(06):563-570.

[85] 张峙, 胡徐彦, 袁辉, 等. 鼠李糖脂纳米乳液的构建及性能研究[J]. 日用化学工业, 2021,51(11):1067-1072.

[86] 王林芝, 郝晋辉, 宋军, 等. 鼠李糖脂润湿煤尘表面特性研究[J]. 煤炭与化工, 2024,47(01):130-134.

[87] 刘燕泽华, 王丽萍, 申佳伟, 等. 鼠李糖脂添加下生物滴滤器净化氯苯废气性能[J]. 中国矿业大学学报, 2022,51(02):401-410.

Advances in the Application of Biosynthesized Rhamnolipids

Huang Yu-hui*, Shi Shuai, Zheng Ling-feng, Guan Xiao-chen, Wang Qiao-yu
(Evonik Specialty Chemicals(Shanghai)Co.,Ltd., Shanghai, 201100)

Abstract : Rhamnolipids are microbial-derived green surfactants with excellent emulsifying, solubilizing, antimicrobial, bioactive, and metal-chelating properties. This paper reviews their recent applications in synergy with enzyme/microbe, skin repair, biofilm inhibition, environmental remediation, heavy metal removal, and personal care. With industrial-scale production underway, rhamnolipids show great promise across cosmetics, agriculture, medicine, and sustainability sectors. Future efforts should focus on process optimization and formulation strategies to enhance yield and cost-efficiency, positioning rhamnolipids as a key ingredient in next-generation green solutions.

Keywords : bio-fermentation; raffinose glycolipid; bioactivity; antibacterial; synergistic enhancement; green core ingredients